

I - 446

応答変位法で用いる地盤ばね定数に関する検討

(株)鴻池組第一技術部○正会員 佐野祐一

神戸大学工学部 正会員 高田至郎

(株)鴻池組第一技術部 正会員 嶋村貞夫

同 正会員 河西 寛

1. まえがき

応答変位法によるシールドトンネルや埋設管等の線状地下構造物の耐震設計では、一般に、構造物を弾性床上の梁にモデル化し、弾性床が正弦波状に変形すると仮定して縦断方向の地震時断面力を求めている。

本研究では、最大級の大口径シールドトンネルを例とし、軸対称FEM解析によりトンネルが正弦波状に変形するときの地盤ばね定数を求め、現行の耐震設計指針類の地盤ばね定数と比較するとともに、地盤ばね定数の違いが発生断面力に与える影響を検討した。また、この大口径トンネルを例とし、2次元FEM解析によりトンネル横断面が複数の地層にまたがる場合の地盤ばね定数の評価方法について検討した。

2. 均一地盤中の円形断面トンネルの地盤ばね定数

(1) 軸対称FEM解析

シールドトンネルを取り囲む地盤を軸対称連続体要素に置換し、トンネルに沿って正弦波分布を呈する軸方向（軸対称）および軸直角方向（非軸対称）の強制変位をトンネル表面の節点に与え、それぞれの反力から地盤反力係数、並びに地盤ばね定数を算定した。トンネル外径は 14.3m、地盤は洪積砂地盤とし、トンネル半径方向がトンネル中心より400mの範囲、トンネル長手方向が地盤振動の波長($L=480\text{m}$)の半分の240mの範囲を解析領域とした。境界の拘束条件は、トンネル半径方向の外端が完全固定、長手方向の上・下端がトンネル軸方向を固定とした。図-1に解析モデルおよび地盤定数を示す。

図-2は、トンネルが正弦波状に変形したときの反力から求めた地盤反力係数を、トンネル軸に沿って表したものである。軸方向地盤反力係数と軸直角方向地盤反力係数は両者ともトンネル軸に沿って一定であるが、前者は後者のおよそ 1/2の大きさであることがわかる。さらに、これらの地盤反力係数はトンネル円周に沿っても一定である。これらの地盤反力係数にトンネル周長を乗じて算出したトンネルに沿った単位長さ当たりの軸方向および軸直角方向地盤ばね定数は、表-1に示すように地盤のせん断弾性係数 G_s のそれぞれ2.1倍、4.1倍であった。

表-1 軸対称FEM解析結果より得られた地盤ばね定数

	軸方向	軸直角方向
地盤ばね定数(tf/m^2)	20,000	39,100
せん断弾性係数 G_s との比率	2.1 G_s	4.1 G_s

(2) 現行耐震設計指針類の地盤ばね定数との比較

現行の耐震設計指針類等の方法で求めたトンネル軸に沿った単位長さ当たりの地盤ばね定数と前述した軸対称FEM解析結果を表-2に比較して示す。また、表-2にはこれらの地盤ばね定数を用い、欄外に示した計算式で求めたトンネルへの地盤ひずみの伝達率を併記した。計算に用いたトンネル剛性は、外径 14.3m

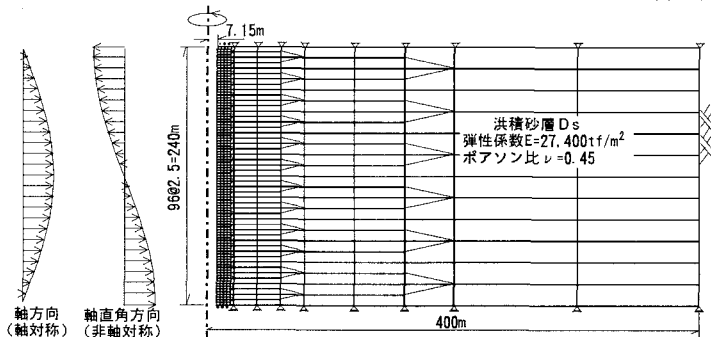


図-1 解析モデル

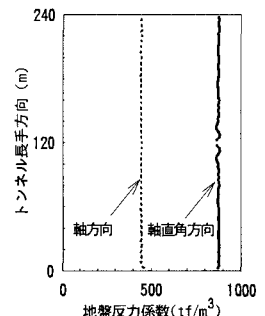


図-2 地盤反力係数

のトンネルは2次覆工を有する条件で、外径5.0mのトンネルは一次覆工のみの条件で設定した。

地盤ばね定数は評価方法の違いによりかなり異なるが、地盤ひずみの伝達率でみると、曲げモーメントに関する地盤ひずみの伝達率は概ね1.0であるため、現行のどの評価方法に基づいて地盤ばね定数を設定しても曲げモーメントの計算値に有為な差は現れにくい。一方、軸力に関する地盤ひずみの伝達率は、トンネルの軸方向剛性が大きくなるほど、地盤ばね定数の違いによる影響が顕在化するため、大口径トンネルの場合、小口径でも2次覆工を設ける場合や軸圧縮力の計算時には注意する必要がある。

表－2 軸対称FEMと現行耐震設計指針類で求めた地盤ばね定数の比較

地盤ばねの評価方法	地盤ばね定数		外径5.0mのトンネルに対する 地盤ひずみの伝達率			外径14.3mのトンネルに対する 地盤ひずみの伝達率		
	K ₁ (tf/m ²)	K ₂ (tf/m ²)	α ₁ (引張)	α ₁ (圧縮)	α ₂	α ₁ (引張)	α ₁ (圧縮)	α ₂
			EA=4.52 ×10 ⁵ tf	EA=9.05 ×10 ⁵ tf	EI=2.61 ×10 ⁷ tf・m	EA=3.70 ×10 ⁷ tf	EA=1.27 ×10 ⁸ tf	EI=8.25 ×10 ⁸ tf・m
軸対称FEM解析（表－1参照）	20.000	39.100	0.996	0.928	1.000	0.759	0.479	0.999
水道施設耐震工法指針	28.350	28.350	0.997	0.948	1.000	0.817	0.566	0.999
共同溝設計指針	9.449	9.449	0.992	0.859	1.000	0.598	0.303	0.997
弾性波動論（高田の方法）	29.680	151.180	0.997	0.950	1.000	0.824	0.577	1.000
道路橋示方書耐震設計編	—	86.400	—	—	1.000	—	—	1.000
無限弾性体中の円孔の解（志波の方法）	—	237.750	—	—	1.000	—	—	1.000
2次元FEM解析（表－3参照）	—	34.420	—	—	1.000	—	—	0.999

ただし、地盤ひずみの伝達率は以下の算定式で求めた。

$$\alpha_1 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_1 L}\right)^2}, \quad \alpha_2 = \frac{1}{1 + \left(\frac{2\pi}{\lambda_2 L}\right)^2} \quad \text{ここに、} \alpha_1, \alpha_2: \text{地盤ひずみの伝達率で、} \alpha_1 \text{は軸力、} \alpha_2 \text{は曲げモーメント及びせん断力に} \\ \text{関係する。} \quad K_1, K_2: \text{地盤ばね定数}(\text{tf/m}^2) \text{で、} K_1 \text{は軸方向、} K_2 \text{は軸直角方向を示す。} \\ \lambda_1 = \sqrt{\frac{K_1}{(EA)_{eq}}}, \quad \lambda_2 = \sqrt{\frac{K_2}{(EI)_{eq}}} \quad (EA)_{eq}, (EI)_{eq}: \text{トンネルの等価剛性で、} (EA)_{eq} \text{は軸剛性、} (EI)_{eq} \text{は曲げ剛性を示す。} \\ L: \text{トンネルに沿った地盤振動の波長(m)で、} L=480\text{m} \text{とする。}$$

3. トンネル横断面が複数の地層にまたがる場合の地盤ばね定数

(1) 解析モデルおよび解析ケース

図－3に示した2次元FEMモデルを用いて、トンネルが2層地盤の地層境界にまたがる場合とそれぞれの地層の均一地盤中に存在する場合の合計3ケースについて、直径14.3mの円孔表面に水平および鉛直方向の単位の静的強制変位を与えたときの反力から、応答変位法で用いる軸直角方向地盤ばね定数を評価した。

(2) 解析結果

表－3にFEM解析結果より算出したトンネル軸に沿った単位長さ当たりの軸直角方向地盤ばね定数を示す。K₂は水平方向に強制変位を与えたときの地盤ばね定数を、K₃は鉛直方向の場合をそれぞれ表している。トンネル横断面が2層地盤の地層境界にまたがる場合の軸直角方向の地盤ばね定数は、上層よりも下層の地盤ばねの影響が若干大きい並列ばね系のばね定数となった。

応答変位法で横断面が複数の地層にまたがるシールドトンネルの曲

げモーメントやせん断力を計算する場合には、軸直角方向地盤ばね定数の違いが断面力に及ぼす影響が小さいことを考慮し、簡便な方法として各地層の地盤ばねで構成された並列ばね系のばね定数を用いてもよいと考えられる。

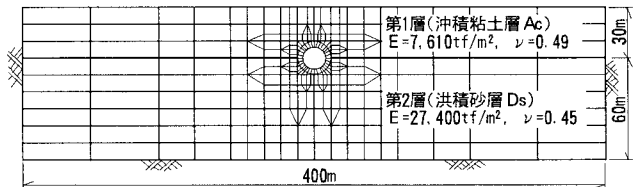
4. あとがき

本報告は地下空間の活用と技術に関する研究協議会¹⁾（座長：京都大学土岐憲三教授）の第3分科会耐震グループ（代表：神戸大学工学部高田至郎教授）の研究成果の一部をとりまとめたものである。最後に御討議いただいた委員、WGメンバーの皆様に感謝いたします。

＜参考文献＞ 1) 土岐 足立、松井：関西における地下空間の活用と技術に関する研究動向(その3)、地下空間の活用と技術1993、土木学会、pp189～198、1993。

表－3 軸直角方向の地盤ばね定数

解析 ケース	第1層	第2層	地盤ばね定数	
			K ₂ (tf/m ²)	K ₃ (tf/m ²)
①	A c	D s	27.580	36.950
②	D s	D s	34.420	44.470
③	A c	A c	9.439	12.220



図－3 2次元FEMモデル図（解析ケース①）